بررسی عددی تأثیر سرعت تغییر شکل بر نمودار حد شکل‌دهی(FLD) فولاد St14 با استفاده از معیار دوشاخه‌ای شدن و مقایسه‌ی آن با نتایج تجربی*

محسن مسلمی[۱] سید جمال حسینی پور[۲] حامد دیلمی عضدی[۳] عبدالحمید گرجی[٤]

چکیده

در فرایندهای شکل‌دهی ورق، استفاده از نمودارهای حد شکل‌دهی (FLD) در مطالعه‌ی شکل‌پذیری ورق‌های فلزی و طرّاحی قالب از اهمیّت بسیاری برخوردار است. نرخ کرنش یکی از عوامل مؤثر در این نمودارهاست که با سرعت تغییر شکل ارتباط مستقیمی دارد. در این تحقیق، نمودار حد شکل‌دهی فولاد St14 به‌طور تجربی و عددی محاسبه و تأثیر سرعت شکل‌دهی بر آن بررسی شده است. از سه سرعت تغییر شکل ۱۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌متر بر دقیقه استفاده شد. در روش مدل‌سازی، از معیار دوشاخه‌ای شدن برای تعیین گلویی استفاده شد. نتایج حاصل از مدل‌سازی و کار تجربی با هم مقایسه شدند. نتایج نشان دادند که سطح کل نمودار حد شکل‌دهی با افزایش سرعت تغییر شکل افزایش می یابد.

واژه‌های کلیدی نمودار حد شکل‌دهی، سرعت شکل‌دهی، معیار دوشاخه‌ای شدن، فولاد St14

Numerical Evaluation of the Effect of Forming Velocity on Forming Limit Diagram (FLD) of St14 Steel using Bifurcation Theory and Comparison with Experimental Results

M. Moslemi   S. J. Hosseinipour   H. D .Azodi   A. Gorji

Abstract

Forming limit diagram (FLD) is an important diagram by which the formability of sheet metals is studied. Strain rate is a very effective parameter influencing the FLD which is, in turn, influenced by the forming velocity. In this work, forming limit diagram for St14 was investigated both experimentally and numerically. In addition, the effect of forming velocity was studied and the experiments were conducted at three different velocities, i.e. 10, 100 and 200 mm/min. In numerical simulation, bifurcation theory was used to determine the necking time. The experimental results were compared with the numerical results and it was shown that the forming limit is increased as the forming velocity increases.

Key Words Forming limit diagram, Forming velocity, Bifurcation criterion, St14 steel.

---

* نسخه‌ی نخست مقاله در تاریخ ۸۸/۷/۵ و نسخه‌ی پایانی آن در تاریخ ۹۱/۸/۱۰ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) دانشجوی کارشناسی ارشد گروه ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بابل

(۲) نویسنده‌ی مسئول: استادیار گروه ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بابل

(۳) استادیار گروه ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی اراک

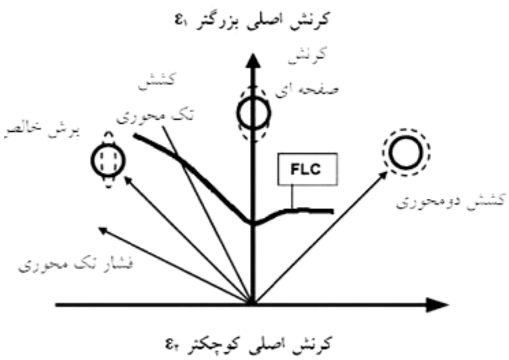
(٤) استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بابل

مقدمه

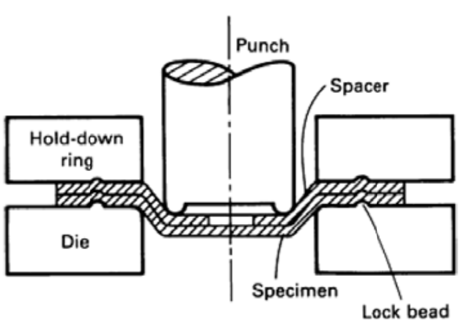
ورق‌های فولاد ساده‌ی کربنی کاربرد گسترده‌ای در صنایع گوناگون، خصوصاً خودروسازی، دارند. از این ورق‌ها عمدتاً در ساخت بدنه‌ی خودرو استفاده می‌شود. برخورداری از اطلاعات کافی در مورد شکل‌پذیری این ورق‌ها در کارایی فرایندهای شکل‌دهی به‌کار رفته تأثیر بسیاری دارد. بنابراین، مطالعه‌ی شکل‌پذیری آن‌ها ضروری به‌نظر می‌رسد.

شکل‌پذیری ورق را می‌توان قابلیّت آن برای تغییر شکل و تبدیل شدن به‌شکل مورد نظر بدون وقوع گلویی یا پارگی تعریف کرد. ورق‌ها را تنها تا حد معینی می‌توان تغییر شکل داد، و این حد با شروع گلویی موضعی که در نهایت منجر به پارگی می‌شود، مشخص می‌شود. رسم نمودار حد شکل دهی (FLD) روشی مرسوم برای مشخص کردن این محدوده است. مطابق با شکل (۱)، منحنی کرنش اصلی بزرگ‌تر (ε_1) برحسب کرنش اصلی کوچک‌تر (ε_2) در لحظه‌ی شروع گلویی این حد را تعیین می‌کند. تا هنگامی که کرنش‌های اصلی پایین منحنی حد شکل دهی (FLC) قرار دارند، در ناحیه‌ی مربوطه در فلز گلویی و پارگی رخ نمی‌دهد، امّا اگر بالای آن قرار گیرد پارگی اتفاق می‌افتد. نسبت کرنش ($\rho = \varepsilon_2 / \varepsilon_1$) نشان‌دهنده‌ی مسیر بارگذاری است، و در این آزمون از حالت کشش دو محوری متقارن ($\rho = 1$) تا حالت نزدیک به کشش تک محوری ($\rho = -1/2$) تغییر می‌کند. نمودارهای حد شکل‌دهی در طراحی قطعه، بهینه‌سازی قالب، آزمایش قالب و کنترل کیفیت حین تولید کاربرد دارند [1و ۲].

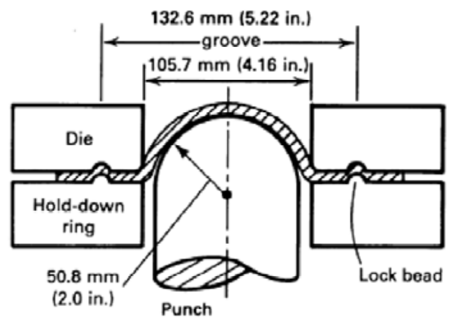
نمودارهای حد شکل‌دهی معمولاً به‌طور تجربی به چند روش به‌دست می‌آیند. روش اوّل، آزمون کشش درون صفحه‌ای (In-plane stretching) است. در این آزمون، همان‌طور که در شکل (۲) نشان داده شده است، ورق از جنس مورد نظر توسط سنبه‌ی استوانه‌ای کشیده می‌شود. یک صفحه‌ی جدا کننده از جنس ورق مورد آزمایش با یک سوراخ در وسط آن، بین سنبه و ورق قرار دارد. نقش این صفحه حذف اثر اصطکاک بین سنبه و ورق است، و در طول فرایند همراه با قطعه‌ی اصلی تغییر شکل می‌دهد. روش دوّم، آزمون کشش بُرون صفحه‌ای (Out-of-plane stretching) است که در آن، از یک سنبه‌ی نیمه کروی برای کشش استفاده شده است و اصطکاک در سطوح سنبه و ورق تأثیر می‌گذرد (شکل ۳). به‌دلیل وجود اصطکاک در این روش، نتایج آن به شرایط واقعی نزدیکترند. در هر دو روش ذکر شده، از نمونه‌هایی با طرح و ابعاد متفاوت برای به‌دست آوردن مسیرهای مختلف کرنش استفاده می‌شود [3].



شکل(۱) نمونه‌ای از نمودار حد شکل‌دهی (FLD) [۲]



شکل(۲) طرح آزمون کشش درون صفحه‌ای مارسنیاک [3]



شکل(۳) طرح آزمون کشش برون صفحه‌ای هکر [3]

کیلر و بَکوفن، [4]، برای اوّلین بار کرنش‌های حدی را برای ورق‌های فلزی به‌صورت تجربی بررسی کرده‌اند. آنها توانسته‌اند که کرنش‌های حدی را برای سمت راست نمودار به‌دست آورند. گودوین، [5]، با ترکیبی از عملیات کشش استوانه‌ای و کشش ورق‌های با عرض‌ها و ضخامت‌های مختلف، نقطه‌های خاصی از حالت کرنش مثبت- منفی (سمت چپ نمودار) را به‌دست آورده و به‌این ترتیب، نمودار حد شکل‌دهی را کامل کرده است. تحقیقات بسیاری به‌منظور پیش بینی نمودارهای حد شکل‌دهی به‌کمک تئوری و مدل‌سازی به‌روش اجزای محدود صورت گرفته است. معیار سوئیفت (Swift) برای پیش بینی و به‌دست آوردن سمت راست نمودار حد شکل‌دهی پیشنهاد شده است. هیل (Hill) پیش بینی کرد که گلویی موضعی زمانی رخ می‌دهد که شرایط تغییر شکل در ورق کرنش صفحه‌ای شود. این تحلیل برای سمت چپ نمودار حد شکل‌دهی ارائه شده است [6]. مارسینیاک و کوزینسکی، [7]، مدلی را مبتنی بر وجود یک نقص اوّلیه به‌شکل کاهش ضخامت برای محاسبه‌ی کرنش‌های حدی در ناحیه‌ی کشش دو محوری ارائه کرده‌اند. این مدل توسط محققان دیگر توسعه یافته است و به‌این ترتیب، نواحی دیگر نمودار حد شکل‌دهی نیز مدل شد. تاکودا و همکارانش، [8]، با استفاده از معیارهای شکست نرم و مدل‌سازی به‌روش اجزای محدود، نمودار حد شکل‌دهی را برای آلیاژهای آلومینیم و فولاد پیش بینی کرده‌اند. استورن و رایس، [9]، معیار دو شاخه‌ای شدن (Bifurcation) را برای پیش بینی پارگی ارائه کرده‌اند که در آن، یک اختلاف سرعت در تغییر شکل در نتیجه‌ی وقوع گلویی موضعی رخ می‌دهد. پیتک و همکارانش، [10,11]، با استفاده از معیار دو شاخه‌ای شدن، اَلگوریتمی را برای تعیین زمان وقوع گلویی موضعی در مدل‌سازی به‌روش اجزای محدود ارائه نموده‌اند. آن‌ها با استفاده از این اَلگوریتم، آزمون کشش در صفحه‌ی مارسینیاک را برای پیش بینی نمودار حد شکل‌دهی مدل کرده‌اند. حسینی‌پور و همکارانش، [۱۲]، با استفاده از اَلگوریتم فوق اثر ناهم‌سان‌گردی (r-value) را بر نمودارهای حد شکل‌دهی به‌کمک روش اجزای محدود بررسی نموده‌اند. آن‌ها نشان داده‌اند که با افزایش ناهم‌سان‌گردی نمودار حد تنش شکل‌دهی (FLSD) بالاتر می‌رود، امّا مسیر تنش تقریباً ثابت می‌ماند. از طرف دیگر، با افزایش ناهم‌سان‌گردی نمودار حد شکل‌دهی (FLC) تغییر چندانی نمی‌کند، ولی مسیر کرنش به‌سمت چپ منتقل می‌شود.

روش‌هایی هم‌چون شکل‌دهی انفجاری، شکل‌دهی الکترومغناطیسی و شکل‌دهی الکتروهیدرولیکی از جمله فرایندهای شکل‌دهی سریع می‌باشند. این فرایندها به‌دلیل هزینه‌ی زیاد تولید کم‌تر مورد توجه قرار گرفته‌اند، امّا در چند سال اخیر نشان داده شده است که شکل‌پذیری فلّزات در سرعت‌های بالا به‌میزان چشم‌گیری بهبود می‌یابد. این باعث شده است تا فرایندهای شکل‌دهی سریع دوباره مورد توجه قرار گیرند. وود، [13]، نشان داده است که شکل‌پذیری نمونه‌های تحت کشش در سرعت‌های بالا به‌طور کلی افزایش می‌یابد. این افزایش در شکل‌پذیری به رفتار ساختاری ماده، و اثرات اینرسی و ضربه‌ی قالب نسبت داده شده است. بالانتیرام و دن، [14,15]، با شکل‌دهی سریع در قالب مخروطی نشان داده‌اند که شکل‌پذیری می‌تواند تا پنج برابر بهبود یابد. آن‌ها اعلام کرده‌اند که

اگر چه اینرسی می‌تواند شکل‌دهی را تا دو برابر افزایش دهد، ولی شکل پذیری در شکل‌دهی سریع به‌دلیل اثر ضربه‌ای قالب تا پنج برابر افزایش می‌یابد. ناکا و همکارانش، [16]، اثر سرعت تغییر شکل را در دماهای مختلف بر روی نمودار حد شکل‌دهی آلیاژ آلومینیم ۵۰۸۳ بررسی کرده‌اند. آنها مشاهده کرده‌اند که نمودار حد شکل‌دهی در محدوده دمایی K ٤٢٣ تا K ۵۷۳ با کاهش سرعت شکل‌دهی شدیداً افزایش می‌یابد، در حالی‌که نمودار حد شکل‌دهی در دمای اتاق نسبت به سرعت شکل‌دهی حساسیتی ندارد. بهبود شکل‌دهی در دمای K ۵۷۳ و سرعت پایین شکل‌دهی مربوط به ضریب بالای حساسیّت به نرخ کرنش ماده در این دما می‌باشد، امّا شکل‌پذیری در دماهای زیر K ٤۷۵ شدیداً متأثر از توان کرنش سختی ماده است. گردویی و داریانی، [17]، یک راه‌حل تحلیلی از ناپایداری ورق فلزی با استفاده از معادله‌ی حرکت به‌جای معادله‌ی پایداری در مدل مارسینیاک – کوزینسکی، و نیز با به‌کارگیری رابطه‌ی ساختاری جانستون- کوک و معیار تسلیم هیل، ارائه کرده‌اند. نتایج آن‌ها تطابق خوبی را با نمودار حد شکل‌دهی تجربی آلیاژ مس داشته است و بهبود شکل‌پذیری را در سرعت‌های بالای شکل‌دهی نشان می‌دهد. گردویی و همکارانش، [18]، تأثیر سرعت شکل‌دهی را به‌شکل تجربی و با استفاده از فرایند شکل‌دهی با سقوط آزاد چکش و شکل‌دهی انفجاری، و نیز به‌صورت عددی بر روی آلیاژ آلومینیم 6061-T6 و فولاد AISI 1045 بررسی کرده‌اند. نتایج آنها نشان داده است که افزایش سرعت شکل‌دهی از حالت شبه استاتیک به ضربه‌ای حین سقوط آزاد چکش و انفجاری باعث بهبود محسوس شکل‌پذیری در آلیاژهای فوق می‌شود.

در این مقاله، تأثیر سرعت شکل‌دهی بر نمودار حد شکل‌دهی فولاد St14 به‌کمک روش اجزای محدود با استفاده از نرم افزار ABAQUS/Explicit 6.8 بررسی شده است. برای این منظور، از آزمون کشش برون صفحه‌ی هکر استفاده شده است. برای پیش بینی آغاز گلویی موضعی، معیار دو شاخه‌ای شدن در نظر گرفته شده است. افزون بر این، آزمایشات تجربی برای مقایسه‌ی نتایج انجام شده‌اند.

کار تجربی

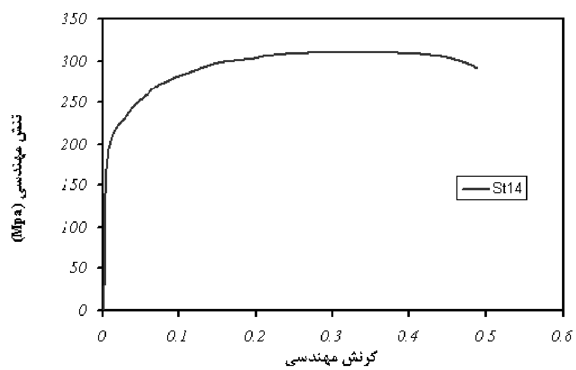
در این تحقیق، از ورق فولاد ساده‌ی کربنی St14 با ضخامت ۰/۹ میلی‌متر استفاده شده است. ترکیب شیمیایی این فولاد در جدول (۱) ارائه شده است. به‌منظور در نظر گرفتن اثر ناهم‌سان‌گردی، مقادیر r (نسبت کرنش) به‌وسیله‌ی آزمون کشش در راستاهای ۰، ٤۵ و ۹۰ درجه نسبت به جهت نورد اندازه‌گیری شدند. نتایج این اندازه‌گیری‌ها در جدول (۲) آمده‌اند. در شکل (٤)، نمودار تنش- کرنش مهندسی حاصل از آزمون کشش در راستای نورد نشان داده شده است. برای به‌دست آوردن نمودار FLD، از روش آزمون کشش برون صفحه استفاده شد. برای ایجاد مسیرهای کرنش مختلف، از دو نوع نمونه‌ی A و B با ابعاد مختلف بر اساس طرح داریانی و همکاران، [19]، استفاده شد (در شکل ۵). همه‌ی نمونه‌ها در راستای نورد ماشین‌کاری شدند، سپس به‌کمک مهر ژلاتینی با دایره‌هایی به قطر ٤/٤ میلی‌متر بر اساس استاندارد ISO 12004 شبکه‌بندی شدند. در شکل (٦)، نمونه‌های شبکه‌بندی شده نشان داده شده‌اند. ورق‌ها درون قالب قرار گرفتند، و اطراف آن‌ها توسط ورق‌گیر و به‌کمک برآمدگی‌های کششی (draw-beads) کاملاً محکم شدند تا از لغزش آن‌ها جلوگیری شود. از یک دستگاه پرس هیدرولیک با ظرفیت ٦۰ تن و بیش‌ترین سرعت حرکت ۲۰۰ میلی‌متر در دقیقه برای انجام آزمایش‌های مورد نظر استفاده شد. آزمون‌ها در سرعت‌های ۱۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌متر در دقیقه انجام شدند. برای اندازه‌گیری شبکه‌های تغییر شکل یافته از نوار مایلر (شکل۷) استفاده شد. با اندازه‌گیری قطرهای بزرگ و کوچک بیضی در شبکه‌های نزدیک به محل پارگی، کرنش‌های اصلی برای هر نمونه محاسبه شدند.

جدول (۱) ترکیب شیمیایی فولاد St14 برحسب درصد وزنی

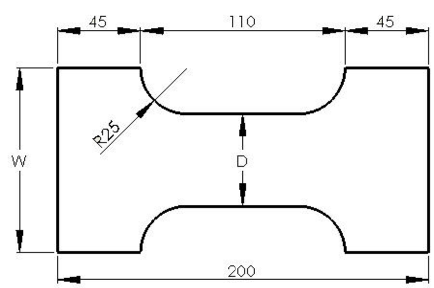
C	Si	Mn	Al	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	عنصر
0.07	0.01	0.22	0.057	0.01	0.006	0.001	0.02	0.01	0.01	درصد وزنی

جدول (۲) مقادیر مختلف r (نسبت کرنش)

$r_m = (r_0 + 2r_{45} + r_{90}) / 4$	r_0	r_{45}	r_{90}
1.51	1.77	1.16	1.94

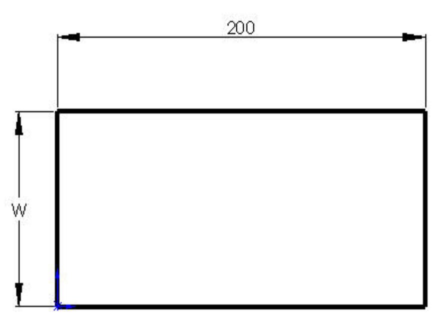


شکل(٤) نمودار تنش- کرنش مهندسی حاصل از آزمون کشش نمونه در راستای نورد



D	W
100	150
75	125
50	100
40	75

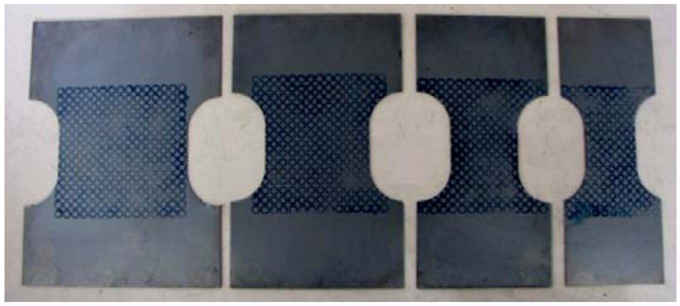
نوع A



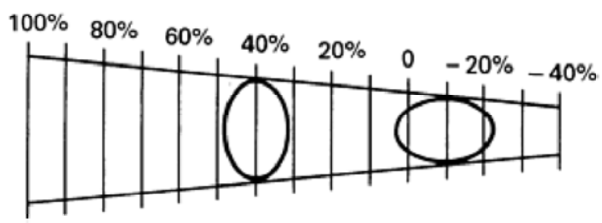
W
200
175
150
125

نوعB

شکل(۵) ابعاد هندسی نمونه‌های مورد استفاده در آزمون‌های کشش برون صفحه‌ای



شکل(٦) نمونه‌های شبکه‌بندی شده در آزمون کشش برون صفحه در راستای نورد

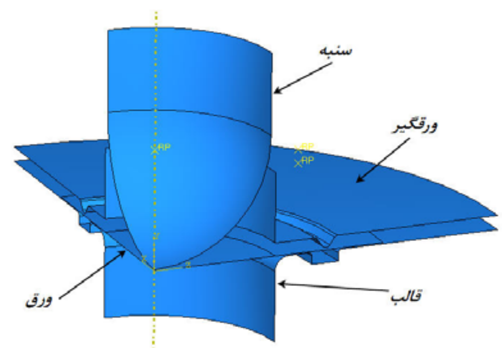


شکل(۷) نوار شفاف مدرج (مایلر)

مدل‌سازی به‌روش اجزای محدود

به‌منظور مدل‌سازی آزمون کشش برون صفحه برای پیش بینی نمودار حد شکل‌دهی ورق فولادی St14، از نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS/Explicit 6.8 استفاده شد. مدل اجزای محدود در شکل (۸) نشان داده شده است. به‌دلیل تقارن هندسی، تنها یک چهارم از مجموعه‌ی قالب و ورق مدل شده است. سنبه، ورق‌گیر و قالب به‌صورت صلب و ورق به‌صورت پوسته‌ای (Shell) مدل شده است. ضخامت اولیّه‌ی ورق ۰/۹ mm در نظر گرفته شده است. رفتار ماده با استفاده از رابطه‌ی توانی ($\sigma = k\varepsilon^n\dot{\varepsilon}^m$) مدل شده است که در آن، k ثابت استحکام، n توان کارسختی و m توان حساسیت تنش سیلان به نرخ کرنش می‌باشند. با رسم نمودار تغییرات Log(σ) بر حسب Log(ε)، مقادیر k=528 MPa و n=0.23 به‌دست آمدند (جدول ۳). مقدار m به‌دلیل اعمال تغییر شکل سرد ناچیز است ،[20]، و بنابراین، از آن صرف‌نظر شده است. سایر خواص ماده‌ای که در مدل‌سازی استفاده شده است در جدول (۳) ارائه شده‌اند. افزون بر این، خواص ناهم‌سان‌گردی ماده بر اساس معیار تسلیم ناهم‌سان‌گرد درجه‌ی دوّم هیل توصیف شدند، و ضرایب مربوطه در جدول (٤) آورده شده‌اند. المان مورد استفاده از نوع پوسته‌ای S4R می‌باشد که در تغییر شکل‌های زیاد و غیر خطی از آن استفاده می‌شود. از جمله خصوصیات بارز المان‌های پوسته‌ای، امکان محاسبه‌ی تغییرات ضخامت و ضخامت نهایی پس از شکل‌دهی می‌باشد. به‌منظور افزایش دقّت محاسبات، از شبکه‌بندی کوچک‌تری در بخش مرکزی نمونه‌های آزمون استفاده شده است. مدل تماسی از نوع سطح به سطح (surface to surface) انتخاب شد که هدف آن برقراری تماس بین دو سطح المان می‌باشد. سطوح قالب و ورق‌گیر که تغییر شکل در آنها انجام نمی‌شود، به‌صورت اصلی (Master) و سطح ورق که امکان تغییر شکل در آن وجود دارد، به‌صورت پیرو (Slave) معرفی شده‌اند. از مدل اصطکاکی کولمب استفاده شد، و ضریب اصطکاک

برای تمامی سطوح برابـر بـا ۰/۲ در نظـر گرفتـه شـد. بارگذاری در دو مرحله انجـام مـی‌گیـرد. در مرحلـه‌ی اول، نیروی ۴۰ kN به ورق‌گیر اعمال می‌شود. ورق‌گیر در جهت عمود بر ورق به سمت پایین حرکت کـرده و ورق را در برآمدگی‌های کششی محکم می‌کند. در ایـن مرحله، سنبه و قالب پایینی ثابت می‌مانند. برآمدگی‌های کششی ماده را شکل داده و از لغزش ماده میان قالب و ورق‌گیر جلوگیری می‌کنند. در مرحله‌ی بعدی، سنبه با سرعت‌های ۱۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌متر بر دقیقه در جهت عمود بر ورق حرکت می‌کند تا به‌این ترتیب جابجـایی لازم رخ دهد.



شکل (۸) مدل اجزای محدود در نرم افزار ABAQUS

معیار دو شاخه‌ای شدن

در این تحقیق، از معیار دو شاخه‌ای شدن بـرای تعیـین آغاز گلویی موضعی استفاده شده است. همان‌طـور کـه اشاره شد، این معیار اوّلین بار توسط استورن و رایـس، [9]، ارائه گردیده است و در آن، یک اخـتلاف سـرعت تغییـر شـکل در نتیجـه‌ی وقـوع گلـویی موضـعی رخ می‌دهد. پیتـک و همکـارانش، [10,11]، بـر اسـاس آن اَلگوریتمی به‌منظـور تعیـین زمـان گلـویی موضـعی در مدل‌سـازی اجـزای محـدود ارائـه نمـوده‌انـد. در ایـن اَلگوریتم و برای تعیین گلویی موضعی، کرنش موم‌سان در راستای ضخامت در نازک‌ترین گره در نظـر گرفتـه شده است. زمانی که گلویی موضعی رخ می‌دهد، تغییر ناگهانی در رفتار کرنش گره‌ی انتخابی مشاهده می‌شود. با رسم نمودار تغییرات کرنش‌هـای اصـلی در راسـتای ضخامت ورق بر حسب زمـان، یـک زانـویی مشـاهده می‌شود که نمایان‌گر تغییرات بیش‌تر کرنش نسـبت بـه زمان است. در این لحظه، مشتق دوم کرنش نسـبت بـه زمان مقدار بیشـینه‌ی خـود را دارد. بـا رسـم تغییـرات مشتق دوم کرنش بـر حسـب زمـان، مـی‌تـوان شـروع گلـویی در نقطـه‌ی پیـک نمـودار را بـه‌دسـت آورد. بنابراین، روش تعیین نمودار حد شکل‌دهی بـه مراحـل زیر تقسیم می‌شود [10,11]:

– جستجوی نازک‌ترین گره‌ها در هر بـازه‌ی زمـانی در مدل اجزای محدود.

– تعیین کرنش در راستای ضخامت (ε_t) در هر بازه‌ی زمانی برای گره‌های تعیین شده.

جدول(۳) خواص مکانیکی ماده‌ی مورد آزمایش

مدول یانگ (GPa)، [۲۱]	E = 210	نسبت پواسون، [۲۱]	ν = 0.3
استحکام تسلیم (MPa)	Y = 201	چگالی (kg/m^3)، [۲۱]	ρ = 7850
استحکام کششی (MPa)	UTS = 312	توان کارسختی	N = 0.23
ضریب استحکام (MPa)	K = 548		

جدول (٤) ضرایب ناهم‌سان‌گردی بر اساس معیار تسلیم ناهم‌ساگرد درجه‌ی دوّم هیل

R_{11}	$R_{22}=\sqrt{\frac{r_{90}(r_0+1)}{r_0(r_{90}+1)}}$	$R_{33}=\sqrt{\frac{r_{90}(r_0+1)}{r_0+r_{90}}}$	$R_{22}=\sqrt{\frac{3r_{90}(r_0+1)}{2(r_{45}+1)(r_0+r_{90})}}$
1	1.016	1.204	1.003

- محاسبه‌ی اوّلین و دوّمین مشتق کرنش اصلی در راستای ضخامت ($\dot{\varepsilon}_t$ و $\ddot{\varepsilon}_t$) در هر بازه‌ی زمانی برای گره‌های تعیین شده.
- مشخص کردن مقدار بیشینه‌ی مشتق دوّم برای گره‌های تعیین شده.
- انتخاب بیش‌ترین مقدار مشتق دوّم زمانی برای یک گره‌ی منحصر به فرد.
- ثبت کرنش‌های اصلی در گره‌ی مورد نظر.

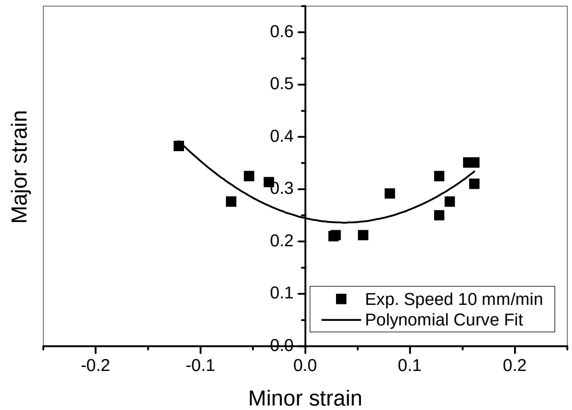
با انجام مراحل ذکر شده برای هر نمونه، نقطه‌های مختلف نمودار حد شکل‌دهی به‌دست می‌آید.

نتایج و بحث

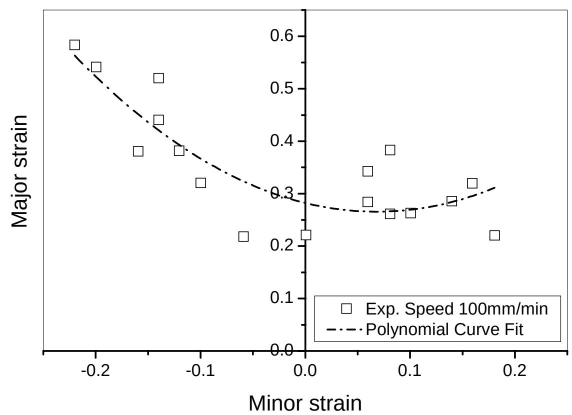
نتایج تجربی. شکل(۹) نمونه‌های تغییر شکل یافته با سرعت ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، همه‌ی نمونه‌ها تا مرحله‌ی پارگی تغییر شکل داده شده‌اند. محل ایجاد پارگی بر روی نمونه‌ها کاملاً مشخص است. این محل بستگی به اصطکاک بین سنبه و ورق دارد. مقادیر کرنش‌های سطح در لحظه‌ی شروع گلویی، نمودار حد شکل‌دهی (FLD) را تشکیل می‌دهند. بعد از اندازه‌گیری کرنش‌ها، نمودار حد شکل‌دهی به‌دست آمد. نمودارهای تجربی حد شکل‌دهی برای سرعت‌های ۱۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌متر بر دقیقه در شکل (۱۰) نشان داده شده‌اند. برای بررسی رفتار نتایج، یک رابطه‌ی چند جمله‌ای بر روی داده‌ها منطبق شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با تغییر مسیر بارگذاری از حالت کشش تک محوری (سمت چپ نمودار، $\rho=-1/2$) به کرنش صفحه‌ای (وسط نمودار، $\rho=0$، جایی که کرنش کوچک‌تر از صفر است و FLD_0 نام دارد)، مقدار حد شکل‌دهی کاهش می‌یابد. پس از آن تا حالت کشش دو محوری متقارن (سمت راست نمودار، $\rho=1$) مقدار حد شکل‌دهی افزایش می‌یابد که این در تطابق با نمودارهای مرسوم FLD (شکل ۱) می‌باشد. نمودارهای تجربی حد شکل‌دهی برای سرعت‌های ۱۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌متر بر دقیقه در شکل (۱۱) با یک‌دیگر مقایسه شده‌اند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، سطح کل نمودار با افزایش سرعت تغییر شکل افزایش یافته است، امّا به‌نظر می‌رسد که سرعت تغییر شکل در محدوده‌ی کشش دو محوری متقارن تأثیر قابل توجه‌ای نداشته و حتی منجر به کاهش حد شکل‌دهی شده است. این رفتار با تأثیر سرعت تغییر شکل در آزمون کشش ساده فرق دارد، زیرا همان‌طور که در بخش مقدمه اشاره شد، در این حالت علاوه بر تأثیر اینرسی یا حساسیّت ماده به نرخ کرنش، تأثیرات اصطکاک و ضربه‌ی سنبه نیز وجود دارند، به‌گونه‌ای که با افزایش سرعت تغییر شکل تأثیر آن‌ها افزایش یافته و منجر به افزایش تنش فشاری در راستای ضخامت ورق شده و در نتیجه، حد شکل‌دهی افزایش می‌یابد. نکته‌ی دیگر این‌که مقدار FLD_0 برای سرعت ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه در حدود ۰/۲۵ می‌باشد. این مقدار به توان کارسختی ماده (n) نزدیک بوده و با نتایج تئوری نیز منطبق است [3].



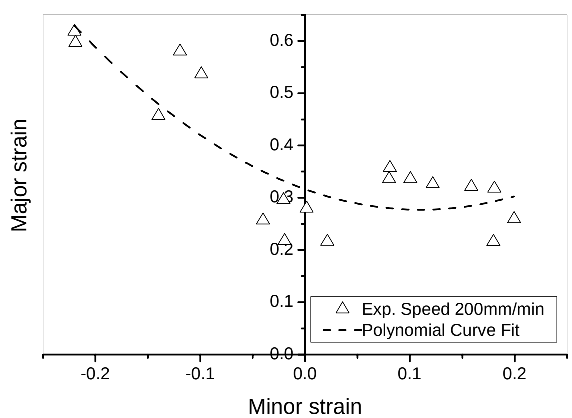
شکل(۹) نمونه‌های تغییر شکل یافته



(الف)

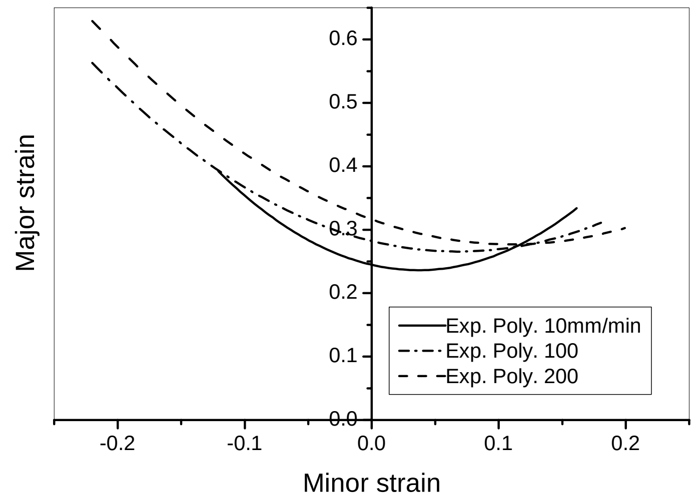


(ب)

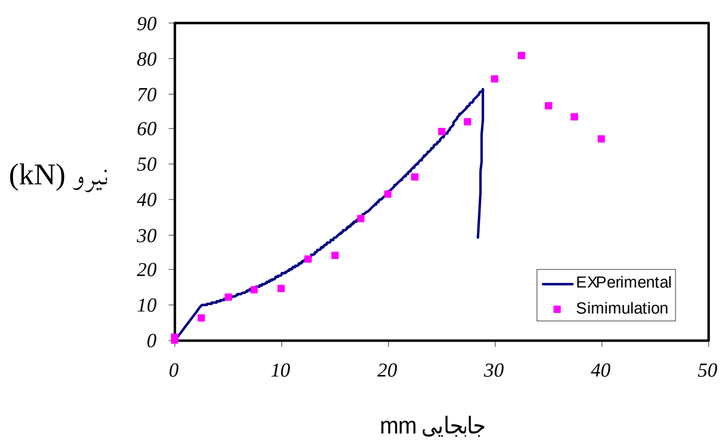


(پ)

شکل(۱۰) نمودارهای تجربی حد شکل‌دهی (FLD) فولاد St14 در سرعت‌های الف) ۱۰، ب) ۱۰۰ و پ) ۲۰۰ میلی‌متر بر دقیقه

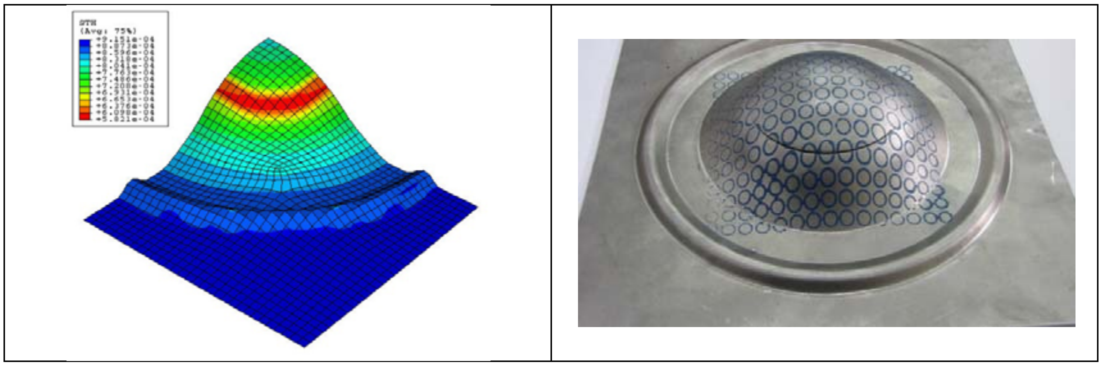


شکل(۱۱) مقایسه‌ی نمودارهای تجربی حد شکل‌دهی (FLD) فولاد St14 در سرعت‌های ۱۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌متر بر دقیقه

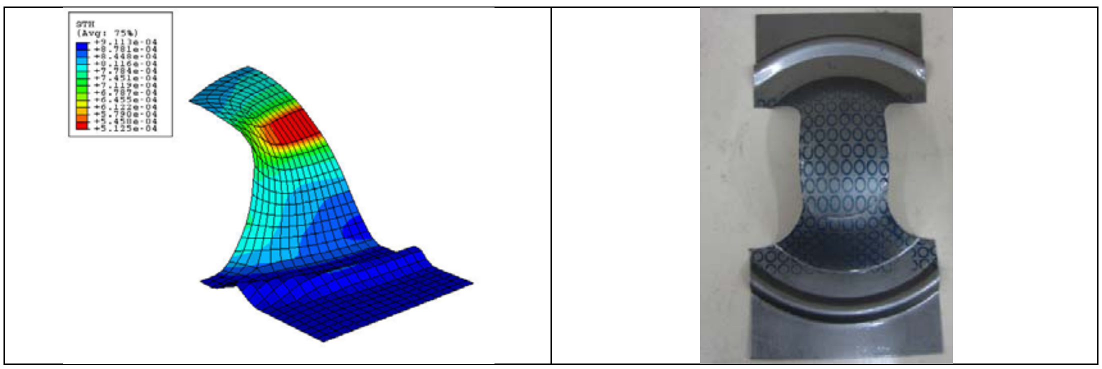


شکل (۱۲) مقایسه‌ی نمودار نیرو- جابجایی تجربی و حاصل از مدل‌سازی در سرعت ۲۰۰ میلی‌متر بر دقیقه

نتایج مدل‌سازی. به‌منظور تأیید درستی مدل‌سازی، نمودارهای نیرو- جابجایی تجربی و محاسبه شده با یک‌دیگر مقایسه شدند. نمودارهای نیرو- جابجایی تجربی و حاصل از مدل‌سازی به‌ازای سرعت ۲۰۰ میلی‌متر بر دقیقه در شکل (۱۲) نشان داده شده‌اند. همان‌طور که دیده می‌شود، نتایج تجربی و مدل‌سازی تطابق خوبی با هم دارند، امّا در نقطه‌ی بیشینه کمی اختلاف وجود دارد که می‌تواند منجر به ایجاد خطا در پیش بینی حد شکل‌دهی شود. این خطا می‌تواند ناشی از تفاوت بین ضریب اصطکاک انتخاب شده در مدل با مقدار واقعی آن باشد. در شکل (۱۳)، نمونه‌های تغییر شکل یافته با مدل‌های آن‌ها مقایسه شده‌اند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، مدل به‌کار رفته در پیش بینی محل گلویی موضعی یا پارگی از دقّت بسیار خوبی برخوردار بوده است، و این تأییدی دیگر بر درستی مدل استفاده شده است.



(الف)

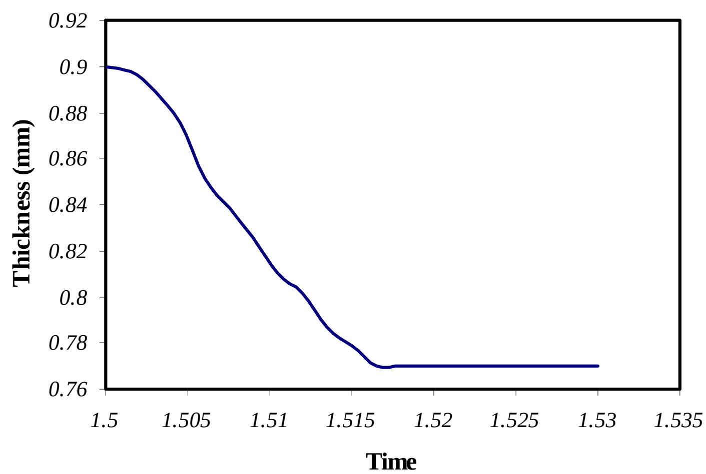


(ب)

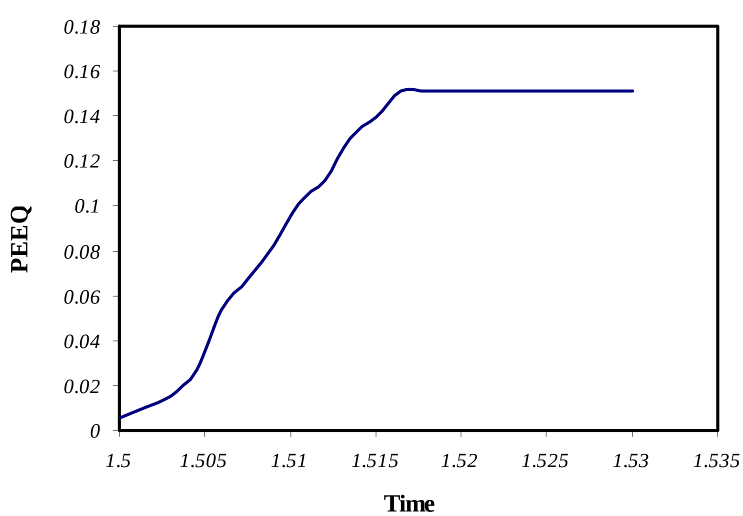
شکل(۱۳) مقایسه‌ی نمونه‌های تغییر شکل یافته با مدل آن‌ها در سرعت 10 mm/min؛
(الف) نمونه‌ی ۲۰۰×۲۰۰ ، و (ب) نمونه‌ی ۱۰۰×۲۰۰

بعد از وقوع گلویی موضعی در ورق، کل نیرویی که به آن وارد می‌شود صرف تغییر شکل در ناحیه‌ی گلویی موضعی می‌شود، و تغییر شکل در این ناحیه تا مرحله‌ی پارگی ادامه می‌یابد و در بخش خارجی آن تغییر شکل متوقف می‌شود. نمودارهای تغییرات ضخامت و کرنش معادل بر حسب زمان خارج از ناحیه‌ی گلویی موضعی در شکل (۱٤) نشان داده شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، پس از زمان مشخّصی تغییرات ضخامت و کرنش با زمان در بیرون از ناحیه‌ی گلویی موضعی متوقف شده است. با توجه به این رفتار، زمان وقوع گلویی و به تناسب آن المان‌ها یا گره‌های بحرانی در مدل‌سازی که گلویی در آن‌ها رخ می‌دهد (نازک‌ترین گره)، تعیین شدند. پس از معلوم شدن نازک‌ترین گره، نمودار کرنش ضخامت برای این گره رسم شد. در شکل (۱۵)، نمودار کرنش در راستای ضخامت بر حسب زمان در ناحیه‌ی گلویی موضعی نشان داده شده است. در زمان وقوع گلویی، یک تغییر شکل ناگهانی در این نمودار مشاهده می‌شود. در مرحله‌ی بعدی، اوّلین و دوّمین مشتق‌های کرنش محاسبه می‌شوند. نمودار مشتق دوم کرنش در راستای ضخامت بر حسب زمان در ناحیه‌ی گلویی موضعی در شکل (۱۵) رسم شده است. در این نمودار،

نقطه‌ی پیک زمان آغاز گلویی موضعی را به‌وضوح نشان می‌دهد. پس از تعیین المان بحرانی، تنش و کرنش این المان پیدا می‌شود. بنابراین، با تغییر هندسه‌ی ورق و تکرار این فرایند برای هر یک از قطعه‌ها، نقاطی از نمودار حد شکل‌دهی را می‌توان به‌دست آورد.

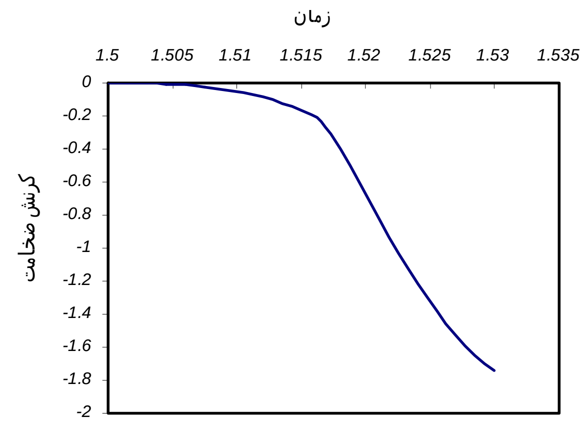


(الف)

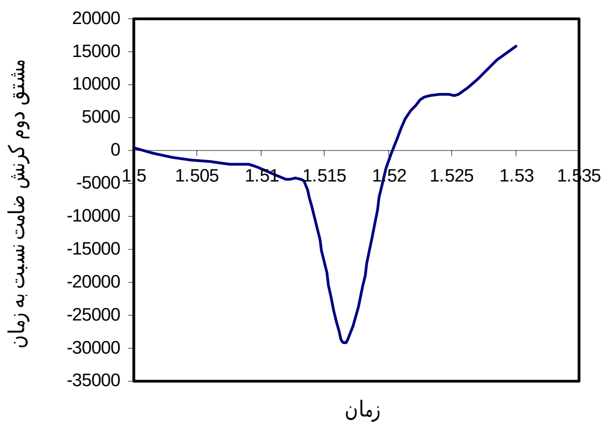


(ب)

شکل(١٤) نمودارهای تغییرات ضخامت (الف)، و کرنش معادل بر حسب زمان (دقیقه) در بیرون از ناحیه‌ی گلویی موضعی (ب)



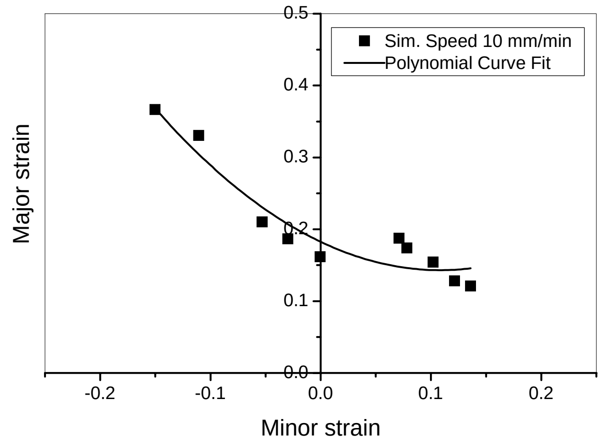
(الف)



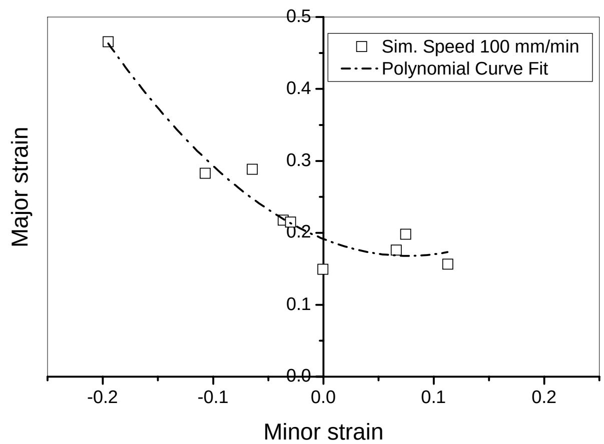
(ب)

شکل(۱۵) نمودارهای کرنش (الف)، و مشتق دوم کرنش در راستای ضخامت بر حسب زمان (دقیقه) در ناحیه‌ی گلویی موضعی (ب)

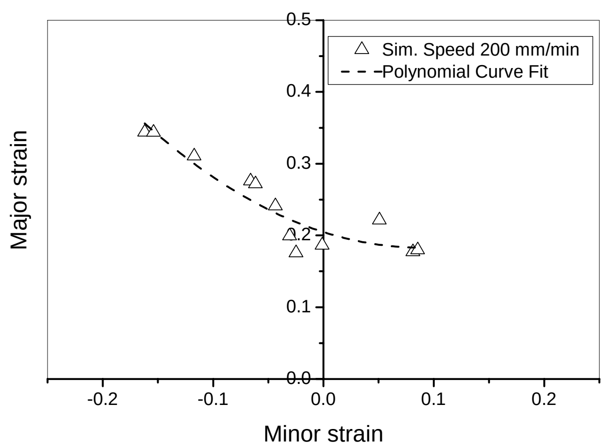
نمودارهای حد شکل‌دهی محاسبه شده در سرعت‌های ۱۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌متر بر دقیقه در شکل (۱٦) نشان داده شده‌اند. به‌منظور بررسی نتایج به‌دست آمده، یک رابطه‌ی چند جمله‌ای بر روی داده‌ها منطبق شده است. در شکل (۱۷)، این نمودارها در سرعت‌های ۱۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌متر بر دقیقه با نمودار مربوط به سرعت ۵ متر بر ثانیه مقایسه شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در سمت چپ نمودار مقدار حد شکل‌دهی، همانند نتایج تجربی، با تغییر مسیر بارگذاری از حالت کشش تک محوری به کرنش صفحه‌ای (FLD_0) کاهش می‌یابد، امّا در سمت راست آن، بر خلاف نتایج تجربی، حد شکل‌دهی با تغییر به حالت کشش دو محوری متقارن هم‌چنان کاهش می‌یابد. افزون بر این، مشاهده می‌شود که در نتایج مدل نیز کل نمودار با افزایش سرعت تغییر شکل افزایش یافته است، امّا مقدار این افزایش نسبت به نتایج تجربی بسیار کم‌تر است. دلیل آن می‌تواند این باشد که در مدل‌سازی از اثر حساسیّت ماده به نرخ کرنش یا اینرسی صرف نظر شده است، در حالی که این می‌تواند در سرعت‌های بالا باعث ایجاد خطا شود. این افزایش در مدل‌سازی صرفاً ناشی از اثر ضربه‌ی سنبه است، به‌گونه‌ای که با افزایش سرعت تغییر شکل تأثیر آن بیش‌تر شده و منجر به افزایش تنش فشاری در راستای ضخامت ورق می‌شود و در نهایت، حد شکل‌دهی افزایش می‌یابد. این رفتار در سرعت ۵ متر بر ثانیه کاملاً مشهود است.



(الف)

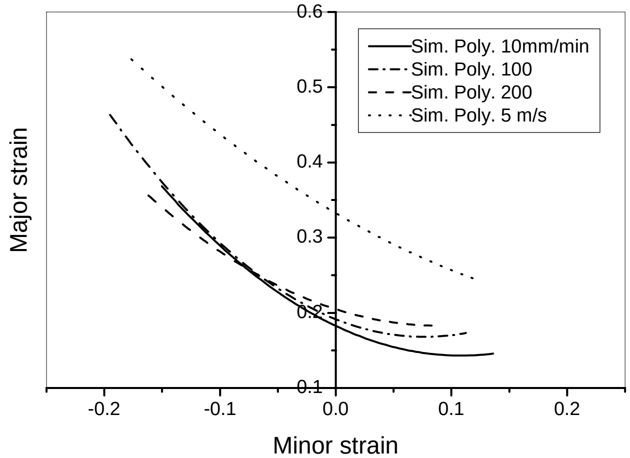


(ب)

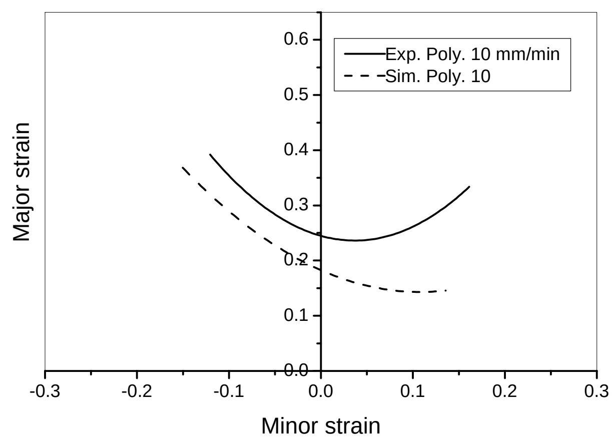


(پ)

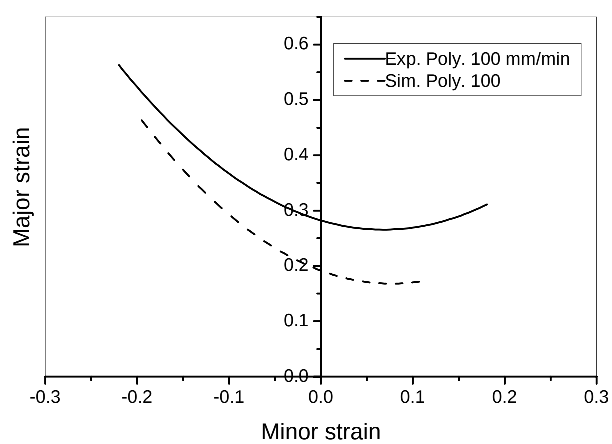
شکل(۱۶) نمودارهای مدل‌شده‌ی حد شکل‌دهی (FLD) فولاد St14 در سرعت‌های الف) ۱۰، ب) ۱۰۰ و پ) ۲۰۰ میلی‌متر بر دقیقه



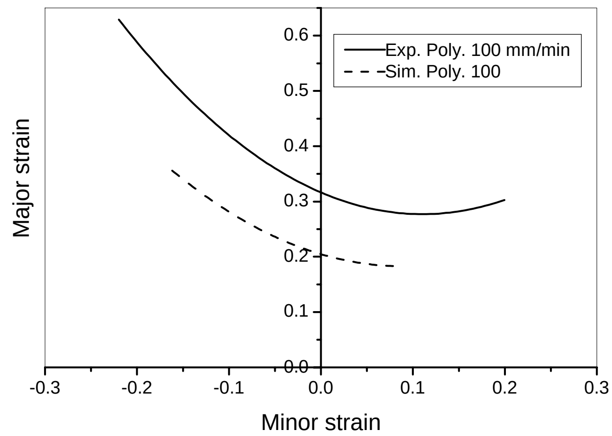
شکل(۱۷) مقایسه‌ی نمودارهای مدل‌شده‌ی حد شکل‌دهی (FLD) فولاد St14 در سرعت‌های ۱۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌متر بر دقیقه و ۵ متر بر ثانیه



(الف)



(ب)



(پ)

شکل(۱۸) مقایسه‌ی نمودارهای FLD فولاد St14 حاصل از مدل‌سازی و نتایج تجربی در سرعت‌های الف) ۱۰، ب) ۱۰۰ و پ) ۲۰۰ میلی‌متر بر دقیقه

نتایج نمودارهای حد شکل‌دهی تجربی و مدل شده در سرعت‌های ۱۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌متر بر دقیقه در شکل (۱۸) با یک‌دیگر مقایسه شده‌اند. مشاهده می‌شود که نمودارهای مدل شده دارای سازگاری مناسبی هستند. به عبارت دیگر، از صحّت کافی برخوردارند، امّا دارای خطا می‌باشند. دلیل وجود خطا را می‌توان از سه جنبه ارزیابی کرد. اوّلین خطا مربوط به اختلاف بین ضریب اصطکاک انتخابی در مدل‌سازی و مقدار واقعی تجربی آن است که عملاً غیر قابل اندازه‌گیری است و در سرعت‌های متفاوت مقدار آن می‌تواند تغییر کند. دوّم، خطای ناشی از در نظر نگرفتن اثر حساسیّت ماده به نرخ کرنش در مدل‌سازی است که اثر آن در سرعت‌های بالای تغییر شکل می‌تواند قابل توجه باشد، و سوّم، خطای ناشی از ماهیّت معیار دوشاخه‌ای شدن است که عملاً نقطه‌ی آغاز گلویی موضعی را پیش بینی می‌کند، در صورتی‌که در روش تجربی حد شکل‌دهی در لحظه‌ی پارگی اندازه‌گیری می‌شود.

نتیجه‌گیری

در این مقاله، تأثیر سرعت شکل‌دهی بر نمودار حد شکل‌دهی فولاد St14 به‌کمک مدل‌سازی اجزای محدود با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS/Explicit 6.8 بررسی شده است. از آزمون کشش برون صفحه‌ی هکر استفاده شد، و برای پیش بینی پارگی معیار دو شاخه‌ای شدن به‌کار رفت. افزون بر این، آزمایشات تجربی به‌منظور مقایسه‌ی نتایج انجام شدند. نتایج حاصل از مدل‌سازی نمودار FLD با استفاده از معیار دوشاخه‌ای شدن نشان دادند که سطح کل نمودار با افزایش سرعت تغییر شکل افزایش می‌یابد، امّا مقدار این افزایش نسبت به نتایج تجربی بسیار کم‌تر است. با توجه به این‌که در مدل‌سازی از اثر حساسیّت تنش سیلان ماده به نرخ کرنش صرف‌نظر شده است، این افزایش در نتایج مدل‌سازی صرفاً ناشی از اثر ضربه‌ی سنبه بوده است، به‌گونه‌ای که با افزایش سرعت تغییر شکل اثر آن افزایش یافته و منجر به افزایش تنش فشاری در راستای ضخامت ورق می‌شود، و به‌این ترتیب حد شکل‌دهی افزایش می‌یابد. نمودارهای مدل شده از صحت کافی برخوردار بودند، امّا دارای خطاهایی بودند. دلیل وجود این خطا می‌تواند ناشی از خطای مربوط به ضریب اصطکاک انتخاب شده در مدل‌سازی، خطای ناشی از در نظر نگرفتن تأثیر حساسیّت ماده به

نرخ کرنش در مدل و خطـای ناشـی از ماهیّـت معیـار دوشاخه‌ای شدن باشد.

مراجع

1. Stoughton, T.B., "A general forming limit criterion for sheet metal forming", Int. *J. of Mech. Sci*., Vol. 42, pp. 1-27, (2000).

۲. قاسمی، س.غ.، "شبیه‌سازی و مقایسه دیاگرامهای حد شکل دهی کرنش و تنش به کمک روش اجزاء محدود"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه مازندران، (۱۳۸۵).

3. Kalpakjian, S., and Schmid, S.R., "Sheet Metal Forming Process", Prentice-Hall, 4th Edition, (2000).

4. Keeler, S.P., and Backhofen, W.A., "Plastic instability and fracture in sheet stretched over rigid punches", ASM Transactions Quarterly, Vol. 56, pp. 25-48, (1964).

5. Goodwin, G.M., "Application of strain analysis to sheet metal forming in the press shop", SAE paper, No. 680093, (1968).

6. Banabic, D., Bunge, H.J., Pohlandt, K., and Tekkaya, A.E., "Formability of Metallic Material", Springer (2000).

7. Marciniak, Z., and Kuckzinsky, K., "Limit strains in the processes of stretch forming sheet metal", *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 9, pp. 609– 620, (1967).

8. Takuda, H., Mori, K., and Hatta, N., "The application of some criteria for ductile fracture to the prediction of the forming limit of sheet metals", *J. Mat*. Proc. Tech., Vol. 95, pp. 116-121, (1999).

9. Storen, S., and Rice, J.R., "Localized Necking in Thin Sheets", *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 23, pp. 421–441, (1975).

10. Petek, A., Pepelnjak, and T., Kuzman, K., "An improved method for determining forming limit diagram in the digital environment", *J. of Mechanical Engineering*, Vol. 51, pp. 330–345, (2005).

11. Pepelnjak, T., Petek, A., and Kuzman, K., "Analysis of the forming limit diagram in digital environment", Advanced Material Research, Vol. 6-8, pp. 697-704, (2005).

۱۲. حسینی پور، س.ج، قاسمی، س.غ ، بخشی جویباری، م.، "مقایسه اثر کارسختی و ناهمسانگردی در منحنی‌های حد شکل دهی کرنش و تنش بکمک روش اجزاء محدود"، نشریه دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد، سال ۲۰، شماره ۲، (۱۳۸۷).

13. Wood, W.W, "Experimental mechanics at velocity extremes very high strain rates", Expl Mech., Vol. 7, pp. 441-446, (1967).

14. Balanethiram, V.S., and Daehn, G.S., "Hyperplasticity: increased forming limits at high workpiece velocity", Scripta Materialia, Vol. 30, pp. 515–520, (1994).

15. Balanethiram, V. S. and Daehn, G.S., "Enhanced formability of interstitial free iron at high strain rate", Scripta Materialia, Vol. 27, pp. 1783-1788, (1992).

16. Naka T., Torikai G., Hino R., and Yoshida F., "The effect of temperature and forming speed on the forming limit diagram for type 5083 aluminum - magnesium alloy sheet", *J. Mat. Proc. Tech*., Vol. 113, pp. 648-653, (2001).

17. Gerdooei M., and Dariani B.M., "Strain-rate-dependent forming limit diagrams for sheet metals", Proc. IMechE, Part B: J. Eng. Mf., Vol. 222, No. 12, pp. 1651–1659, (2008).

18. Dariani B. M., Liaghat G. H., and Gerdooei M., "Experimental investigation of sheet metal formability under various strain rates", Proc. IMechE, Part B: J. Eng. Mf., Vol. 223, No. 6, pp. 703–712, (2009).

19. Dariani B.M., and Azodi H.D., "Finding the optimum Hill index in the determination of the forming limit diagram", Proc. *Int. Mech. Engrs, Part C: J. Mechanical Engineering Science,* Vol. 217, pp. 1677–1683, (2003).

20. Dieter G.E., "Mechanical Metallurgy", SI Metric Edition, McGraw-Hill Book Company, (1988).

21. ASM Handbook, Volume 1, "Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys", 10th Edition, (1993).